

19 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

12 Patentschrift  
10 DE 195 10 250 C 1

21 Aktenzeichen: 195 10 250.9-35  
22 Anmeldetag: 21. 3. 95  
43 Offenlegungstag: —  
45 Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: 2. 5. 96

51 Int. Cl.<sup>8</sup>:  
H01 L 41/083  
H01 L 41/12  
H04 R 15/00  
// H01L 41/18, A61B  
17/225, F04B 43/04

DE 195 10 250 C 1

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

73 Patentinhaber:  
Siemens AG, 80333 München, DE

72 Erfinder:  
Kappel, Andreas, Dipl.-Phys., 81369 München, DE;  
Mock, Randolph, Dr., 81739 München, DE; Melxner,  
Hans, Prof. Dr., 85540 Haar, DE

56 Für die Beurteilung der Patentfähigkeit  
in Betracht gezogene Druckschriften:

DE 42 20 228 A1  
US 47 57 219  
US 40 32 929

DE-B.: JANOCHA, H.: Aktoren, Springer Verlag,  
1992, S.278-293;

54 Magnetostriktiver Aktor

57 Auf der Basis des magnetostriktiven Materials  $Tb_{1-x}Dy_xFe_2$  (Terfenol) lassen sich Antriebsselemente entwickeln, die bei vergleichbaren mechanischen Eigenschaften und Stellwegen ein gegenüber piezoelektrischen Aktoren deutlich kleineres Bauvolumen aufweisen. Trotz dieser Eigenschaften kommen magnetostriktive Aktoren bisher nur dort zum Einsatz, wo keine schnellen Schaltvorgänge oder Stellbewegungen erforderlich sind.

Die Anmeldung beschreibt einen magnetostriktiven Dünnschichtaktor, der eine kleine Eigeninduktivität besitzt und daher sehr schnell auf elektrische Ansteuerungssignale anspricht. Das in Form eines Mäanders auf einem Substrat (3) angeordnete Leiterelement des Aktors ist geschichtet aufgebaut, wobei mindestens eine der jeweils nur wenige Mikrometer dicken Schichten beispielsweise aus Terfenol (1) besteht. Da die mit elektrischen Anschlüssen versehene Terfenolschicht (1) selbst als Spulenelement wirkt, läßt sich neben dem von einer in unmittelbarer Nachbarschaft angeordneten Leiterschicht (2) erzeugten äußeren Magnetfeld auch das durch den im magnetostriktiven Material (1) fließenden Strom hervorgerufene innere Magnetfeld für aktorische Zwecke nutzen. Magnetostriktive Dünnschichtaktoren lassen sich insbesondere als Antrieb für miniaturisierte Ventile, Biegeelemente und Pumpen verwenden.

FIG 10a



FIG 10e

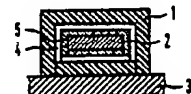


FIG 10b



FIG 10f

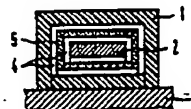


FIG 10c



FIG 10g

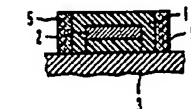


FIG 10d



DE 195 10 250 C 1

## Beschreibung

## 1. Einleitung und Stand der Technik

Die spontane Längen- und Formänderung magnetischer Substanzen in einem die Magnetisierungsrichtung ändernden äußeren Magnetfeld wird als Magnetostraktion bezeichnet. Diesen Effekt nutzt man insbesondere in sogenannten Aktoren, um elektrische bzw. magnetische Energie in mechanische Energie umzuwandeln (s. beispielsweise /1/). Der magnetostraktive Effekt hängt oft in komplizierter Weise von der Magnetisierungsrichtung, jedoch nicht von deren Vorzeichen ab. Im Magnetfeld dehnen sich magnetostraktive Materialien nur vergleichsweise wenig. So beobachtet man bei Legierungen mit den Bestandteilen Eisen, Nickel oder Kobalt relative Längenänderungen im Bereich von  $\Delta l/l \approx 10^{-5}$  bis  $10^{-6}$ . Wesentlich stärker ausgeprägt ist der magnetostraktive Effekt bei Seltenerdmetall-Eisenlegierungen, wo man Werte bis zu  $\Delta l/l \approx 3 \cdot 10^{-3}$  mißt.

Besondere Bedeutung für die Herstellung von magnetostraktiven Aktoren hat der Anfang der 60iger Jahre in den Vereinigten Staaten entwickelte und unter der Handelsbezeichnung TERFENOL bekannte Werkstoff  $Tb_x Dy_{1-x} Fe_2$  (TERFENOL-D:  $x = 0,3$ ) erlangt. Auf der Basis dieses durch die in der Tabelle angegebenen

relative Längenänderung $\Delta l/l$		2 - 3	( .1,5 )	$10^{-3}$
Energiedichte	$E_v$	14...25	( 1 )	$10^3 \text{Ws/m}^3$
Druckfestigkeit	$T_c$	700	(>600 )	$\text{N/mm}^2$
Zugfestigkeit	$T_D$	28	(= 80 )	$\text{N/mm}^2$
Wärmeleitfähigkeit	$\lambda$	110	( 1,2 )	$\text{W/mK}$
Spez. el. Widerstand	$\rho_{el}$	0,6		$10^{-6} \Omega\text{m}$
Curie-Temperatur	$\theta_C$	380	( 165 )	$^\circ\text{C}$
Dichte	$\rho$	9,25	( 7,8 )	$\text{kg/m}^3$

Parameter gekennzeichneten Materials (die entsprechenden Werte der Piezokeramik PXE 52 stehen in Klammern) lassen sich Antriebselemente entwickeln, die bei vergleichbaren mechanischen Eigenschaften und Stellwegen ein gegenüber piezokeramischen Aktoren deutliches kleineres Bauvolumen aufweisen.

Eine auf einem Biegeelement angeordnete magnetostraktive Dünnschicht bildet die aktive Komponente des aus /2/ bekannten elektromechanischen Wandler. Das die Magnetostraktion hervorruhende äußere Magnetfeld erzeugt eine konventionelle Luftspule oder ein mit den Mitteln der Dickfilmentechnik hergestelltes Leiterbahnsystem. Um das Magnetfeld im Bereich des magnetostraktiven Materials zu verstärken, ist die Dünnschicht mit einem Weichmagnetischen Material (Fe-Ni-Legierung) ummantelt.

Der einer papierbespannten Walze gegenüberliegende Kopf des aus /3/ bekannten Tintenstrahldruckers weist eine Vielzahl linear angeordneter Düsen auf, welche jeweils mit einer Kammer und einem Vorratsbehälter für das Druckmedium in Verbindung stehen. Düsenplatte, Vorratsbehälter und zwei durch Abstandshalter voneinander getrennte Membranen bilden die Kammerwände. Die Membranen sind geschichtet aufgebaut, wobei die äußeren Schichten jeweils aus Nickel, die kammerseitigen Schichten jeweils aus einer Fe-Co-Ni-Legierung bestehen. Da diese Materialien sich in einem äußeren Magnetfeld verschieden stark dehnen, kann man das Volumen der Kammern durch Bestromen entsprechend plzierter Leiterelemente individuell ändern. Als Leiterelemente dienen Metallisierungen aus Kupfer, die in einen elektrischen Isolator eingehüllt und auf den äußeren bzw. kammerseitigen Membranflächen angeordnet sind.

Druckschrift /4/ beschreibt einen laminar aufgebauten magnetostraktiven Aktor, dessen jeweils nur etwa 80  $\mu\text{m}$  dicke Schichten aus einer amorphen eisenhaltigen Legierung bestehen.

Hinsichtlich der Ansprechzeiten sind die mit konventionellen Spulen ausgestatteten magnetostraktiven Antriebselemente den Piezoaktoren deutlich unterlegen. So beträgt die Ansprechzeit von magnetostraktiven Wandlern mindestens 1 ms — 10 ms. Eine Verbesserung des Ansprechverhaltens ist kaum mehr möglich, da das die Magnetostraktion hervorruhende äußere Magnetfeld eine Mindeststärke aufweisen muß, was die kleinstmögliche Induktivität der felderzeugenden Zylinderspule und damit auch die nicht unterschreitbare Mindestansprechzeit festlegt.

## 2. Ziele und Vorteile der Erfindung

Ziel der Erfindung ist die Schaffung eines kompakt aufgebauten magnetostraktiven Aktors, der eine sehr kleine Eigeninduktivität besitzt und daher sehr schnell auf elektrische Ansteuersignale anspricht. Der Aktor soll insbesondere auch im Bereich der Mikromechanik als Antrieb für miniaturisierte Ventile, Biegeelemente, Pumpen usw. verwendbar sein. Ein Aktor mit den in Patentanspruch 1 angegebenen Merkmalen besitzt diese Eigenschaften. Die abhängigen Ansprüche betreffen vorteilhafte Ausgestaltungen und Weiterbildungen des erfindungsgemäßen Aktors.

In bekannten magnetostraktiven Aktoren sind die stellweg- und magnetfelderzeugenden Komponenten so-

wohl räumlich als auch funktionell voneinander getrennt. Die Erfindung hingegen hebt diese Trennung weitgehend auf, da man die mit elektrischen Anschlüssen versehenen magnetostruktiven Schichten selbst als Spulenelemente verwendet und/oder das Magnetfeld in deren unmittelbarer Nachbarschaft erzeugt. Hierdurch ist es erstmals möglich, das durch den im magnetostruktiven Material fließenden Strom hervorgerufene innere Magnetfeld für aktorische Zwecke zu nutzen. Die Ansprechzeit hängt somit nur noch von der Eigeninduktivität der magnetostruktiven bzw. elektrisch leitenden Dünnschichten und nicht mehr von der vergleichsweise großen Induktivität einer das magnetostruktive Stellglied umschließenden Zylinderspule ab. Erfindungsgemäße Aktoren lassen sich daher überall dort einsetzen, wo schnelle Steuervorgänge und Stellbewegungen erforderlich sind.

### 3. Zeichnungen

Die Erfindung wird im folgenden anhand der Zeichnungen erläutert. Hierbei zeigt:

Fig. 1 einen in axialer Richtung stromdurchflossenen magnetostruktiven Leiter, das H-Feld innerhalb des Leiters und die Abhängigkeit der Feldstärke vom Abstand  $r$ ;

Fig. 2 die Gestalt eines runden magnetostruktiven Leiterelements im bestromten und unbestromten Zustand in perspektivischer Ansicht;

Fig. 3 und 4 Biegeelemente, auf deren Zunge jeweils ein magnetostruktiver Dünnschichtaktor angeordnet ist;

Fig. 5 bis 8 Ausführungsbeispiele magnetostruktiver Dünnschichtaktoren;

Fig. 9, 10 Querschnitte von Leiterelementen magnetostruktiver Dünnschichtaktoren;

Fig. 11 ein mit einem magnetostruktiven Dünnschichtaktor ausgestattetes Mikroventil;

Fig. 12 ein mit einem magnetostruktiven Dünnschichtaktor und einem Reflektor ausgestattetes Biegeelement;

Fig. 13, 14 Querschnitte von draht- bzw. rohrförmigen magnetostruktiven Leiterelementen;

Fig. 15 durch Falten bzw. Aufrollen eines magnetostruktiven Bandes hergestellte Aktoren.

### 4. Magnetostruktive Aktoren

#### 4.1 Die Wirkungsweise magnetostruktiver Aktoren

Die Erfindung macht im wesentlichen von der relativ großen elektrischen Leitfähigkeit magnetostruktiver Materialien Gebrauch. So läßt sich insbesondere Terfenol als Material für Leiterelemente verwenden, da sein spezifischer elektrischer Widerstand etwa  $\rho = 60 \times 10^{-6}$  Ohm/cm beträgt. Zur Verdeutlichung des Wirkprinzips der im folgenden beschriebenen Aktoren, zeigt Fig. 1 das magnetische H-Feld im Innern eines in axialer Richtung stromdurchflossenen magnetostruktiven Leiters 11 mit kreisförmigen Querschnitt (Radius:  $R$ ). Das magnetische Feld  $H$  steigt zunächst linear mit dem Abstand  $r$  gemäß

$$H\left[\frac{A}{m}\right] = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot I \cdot \left(\frac{r}{R^2}\right) \quad r \leq R \quad (1)$$

auf den Maximalwert

$$H_M = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot I \cdot \left(\frac{1}{R}\right) \quad (2)$$

an der Leiterbahnoberfläche an, um dann im Außenraum gemäß der Beziehung

$$H = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot I \cdot \left(\frac{1}{r}\right) \quad r > R \quad (3)$$

abzufallen ( $I$  = Stromstärke,  $\mu_0$  = Induktionskonstante). Für die magnetische Induktion  $B$  gilt

$$B(T) = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H \quad (4)$$

wobei  $\mu_r$  die relative Permeabilität des Materials im Leiterinnern bzw. im Außenraum bezeichnet.

Der magnetostruktive Effekt hängt vom verwendeten Material, von dessen Morphologie/Kristallstruktur/Textur und von der Orientierung des magnetischen Feldes ab. Man unterscheidet Materialien mit positiver und negativer Magnetostruktion, wobei der jeweils auftretende Effekt unabhängig ist von der Polarität des Magnetfeldes. Von technischer Bedeutung sind vor allem Materialien mit positiver Magnetostruktion, da sie sich in Richtung des anliegenden Magnetfeldes vergleichsweise stark ausdehnen. Falls das in Fig. 2 dargestellte Leiterelement 11 (Durchmesser:  $d$ , Länge:  $l$ ) aus einem solchen Material besteht, wird es bei Bestromung folglich seine lateralen Abmessungen ( $d = d_0 + \Delta d$ ) und damit seine Querschnittsfläche vergrößern. Nach dem Gesetzen der Elastostatik hat jede Querkontraktion/-Expansion eine entsprechende Änderung der Länge  $l$  des Leiterelements zur Folge, wobei die Längenänderung  $\Delta l$  durch

$$\frac{\Delta d}{d} = -\mu \frac{\Delta l}{l} \quad (5)$$

$$\Delta l = -\frac{l}{\mu} \left( \frac{\Delta d}{d} \right) \quad (6)$$

gegeben ist. Typische Werte der in Gleichung (5) mit  $\mu$  bezeichneten Querkontraktionszahl liegen im Bereich von  $0,2 \leq \mu \leq 0,5$ . In einem beispielsweise aus Terfenol gefertigten Leiterelement 11 treten daher Zugspannungen in Richtung des Stromflusses und senkrecht zur Stromrichtung wirkende Druckspannungen auf. Ein entsprechendes Verhalten zeigen Leiterelemente, die aus einem einen negativen magnetostriktiven Effekt zeigenden Material bestehen. Die Zug- und Druckspannung wirken dann allerdings senkrecht zur bzw. in Stromrichtung.

Ordnet man ein magnetostriktives Leiterelement 11 beispielsweise auf einer durch anisotropes Ätzen einer passivierten Siliziumscheibe 13 hergestellten  $\text{SiO}_2$ -Biegezungge 14 an (s. Fig. 3, 4), so erfährt die Zunge 14 bei Bestromung des als Aktor wirkenden Leiterelements 11 eine Auslenkung. Die Richtung der Auslenkung hängt hierbei ab von der Richtung des Stromflusses innerhalb des magnetostriktiven Leiterelements 11 bezüglich der Drehachse der Biegezungge 14 und der Anordnung des Leiterelements 11 auf der Zungenober- oder -unterseite. Magnetostriktive Aktoren zeigen hierbei ein den Bimetallelementen bzw. den Bimorphen ähnliches Verhalten.

#### 4.2 Mit magnetostriktiven Dünnschichtaktoren ausgestattete Biegeelemente

Der in Fig. 3 dargestellte Dünnschichtaktor besitzt eine Kontaktierung, die einen senkrecht zur Drehachse der Biegezungge 14 orientierten Stromfluß innerhalb des magnetostriktiven Materials erzwingt. Die Zuführung des Stromes I erfolgt über niederohmige, beispielsweise aus Al, Au, Ag, Ti, W oder Cu bestehende und durch die  $\text{SiO}_2$ -Passivierung vom Siliziumsubstrat 13 isolierten Leiterbahnen 15, 16. Im bestromten Zustand entsteht in der magnetostriktiven Dünnschicht 11 die in Pfeilrichtung wirkende Zugspannung  $\sigma_z$ , so daß sich die mit dem Aktor verbundene  $\text{SiO}_2$ -Zunge unter der Wirkung des daraus resultierenden Drehmoments nach oben verbiegt. Die gleichzeitig auftretende und parallel zur Drehachse der  $\text{SiO}_2$ -Zunge 14 gewichtete Druckspannung  $\sigma_D$  beeinflusst die Auslenkung hingegen nicht. Sie hat allenfalls eine leichte Verwölbung der  $\text{SiO}_2$ -Zunge 14 zur Folge. Nach dem Abschalten des Stromes I nimmt der Aktor wieder seine ursprüngliche Gestalt an und die Zunge 14 kehrt unter dem Zwang elastischer Kräfte in ihre Ruhestellung zurück.

Der in Fig. 4 dargestellte Dünnschichtaktor lenkt die  $\text{SiO}_2$ -Zunge 14 nach unten aus, da der Strom I im magnetostriktiven Material auf Grund der Kontaktierung parallel zur Drehachse der  $\text{SiO}_2$ -Zunge 14 fließt und die entstehende Druckspannung  $\sigma_D$  ein entsprechendes Drehmoment erzeugt. Die gleichzeitig auftretende, parallel zur Drehachse der  $\text{SiO}_2$ -Zunge 14 orientierte Zugspannung  $\sigma_z$  trägt hingegen nichts zum gewünschten Effekt bei.

Durch die parallele Anordnung mehrerer gleichartiger magnetostriktiver Elemente 11 auf der Oberfläche der Biegezungge 14, kann man die wirkende Biegekraft erheblich verstärken. Entsprechende Aktoren sind in den Fig. 5 und 6 dargestellt. Aufgrund der mäanderförmigen Struktur des Aktors fließt der Strom I in benachbarten Leiterelementen 11 jeweils in entgegengesetzter Richtung. Die Aktoren besitzen daher eine sehr kleine Eigeninduktivität, was sie für schnelle Schaltanwendungen besonders geeignet macht.

Um die vom Dünnschichtaktor gemäß Fig. 5 erzeugten, senkrecht zur Drehachse 17 der  $\text{SiO}_2$ -Zunge 14 wirkende Zugspannung gegenüber der gleichzeitig auftretenden, parallel zur Drehachse 17 gerichteten und lediglich eine Verwölbung der Zunge 14 hervorrufenden Druckspannung zu maximieren (vgl. Fig. 3), ist die durch

$$l_g = n \times l \quad (7)$$

definierte Länge  $l_g$  ( $n$ : Anzahl der parallel zu einander orientierten Leiterelemente 11,  $l$ : Länge eines in Richtung der Drehachsen normalen gemessenen Leiterelementes 11) sehr viel größer gewählt als die durch

$$L_g = n \times L \ll l_g \quad (8)$$

gegebene Länge  $L_g$  ( $L$ : Länge des in Richtung der Drehachse 17 gemessenen Leiterelements 11).

Der in Fig. 6 dargestellte Aktor erzeugt ein die  $\text{SiO}_2$ -Zunge 14 in die Zeichenebene nach unten auslenkendes Drehmoment. Da hier die senkrecht zur Drehachse 17 wirkende Druckspannung möglichst groß, die nicht zum gewünschten Effekt bei tragender Zugspannung hingegen möglichst klein sein soll (vgl. Fig. 4), müssen die oben definierten Längen der Bedingung

$$L_g = n \times L > l_g = n \times l \quad (9)$$

genügen.

Die parallel zur Drehachse 17 der  $\text{SiO}_2$ -Zunge 14 gerichtete Komponente der mechanischen Spannung läßt sich vollständig unterdrücken, wenn man die diese Komponente erzeugenden Abschnitte 18 des Aktors aus einem nicht magnetostriktiven aber elektrisch leitfähigen Material (z. B. Al ...) herstellt (s. Fig. 7, 8). So erzeugt der Aktor gemäß Fig. 7 keine parallel zur Drehachse 17 gerichtete Druckspannung (vgl. Fig. 3, 5), der Aktor

gemäß Fig. 8 hingegen keine parallel zur Drehachse 17 wirkende Zugspannung (vgl. Fig. 4, 6).

Wie die in Fig. 9a und 9b gezeigten Schnitte durch ein Leiterelement 11 des Aktors zeigen, besteht dieses im einfachsten Fall aus einer auf einem Substrat 3 angeordneten bzw. von diesem durch ein Dielektrikum 4 getrennten magnetostriktiven Dünnschicht 1 (Dicke:  $d \approx 2 \mu\text{m}$ , Breite:  $b \approx 100 \mu\text{m}$ ). Um die magnetische Induktion in der magnetostriktiven Schicht 1 zu erhöhen und damit die Leistung bzw. den Wirkungsgrad des Aktors zu verbessern, kann man die folgenden Maßnahmen ergreifen:

- a) Geschichteter Aufbau der Leiterelemente 11 aus magnetostriktiven und elektrisch gut leitenden Materialien. Die Parallelschaltung der magnetostriktiven und der elektrischen Leiter erhöht die Stromtragfähigkeit des Systems erheblich, was stärkere Magnetfelder am Ort des magnetostriktiven Materials ermöglicht. Der Strom fließt dann mit einer von den elektrischen Widerständen der Materialien abhängigen Stärke in den jeweiligen Schichten. Zum magnetostriktiven Effekt trägt sowohl das durch den im magnetostriktiven Material fließenden Strom erzeugte innere Magnetfeld, als auch das durch den parallel geführten elektrischen Leiter hervorgerufene magnetische Streufeld bei. Die Fig. 9c ff. zeigen entsprechende Leiterelemente im Querschnitt.
- b) Aufbauten gemäß a), wobei eine Isolatorschicht den magnetostriktiven und den elektrischen Leiter trennt (s. beispielsweise Fig. 9c). Diese Maßnahme ermöglicht es, die Stromstärken im magnetostriktiven und elektrischen Leiter unabhängig voneinander einzustellen, wobei der magnetostriktive Leiter im Extremfall auch stromlos bleiben kann. In einer äquivalenten Ausführungsform werden der magnetostriktive und der elektrische Leiter unmittelbar nebeneinander auf dem Substrat angeordnet (nicht dargestellt).
- c) Aufbauten gemäß a) und b) mit einem aus einem ferromagnetischen Material (z. B. Fe) bestehenden elektrischen Leiter (s. beispielsweise Fig. 9d).
- d) Aufbauten gemäß a) bis c) mit einer zusätzlichen, aus einem ferromagnetischen Material bestehenden Schicht, die in unmittelbarer Nachbarschaft der magnetostriktiven und der elektrisch leitenden Schicht angeordnet ist (s. beispielsweise Fig. 9e bis 9i).
- e) Aufbauten gemäß a) bis d), wobei ein Isolator die elektrisch leitfähige ferromagnetische Schicht von den anderen Schichten trennt (s. beispielsweise Fig. 9h).
- f) Aufbauten gemäß a) bis e) mit einem elektrisch leitfähigen Kern, der von den anderen Materialien umhüllt ist (s. Fig. 10).

Als magnetostriktive Materialien (Bezugszeichen (1) in den Fig. 9, 10, 13 und 14) kommen insbesondere Terfenol,  $\text{TbFe}_2$ ,  $\text{DyFe}_2$  bzw.  $\text{SmFe}_2$ ; als metallische Leiter (2) Al, Au, Ag, Ti, W, und Cu; als Substrat (3) Si,  $\text{SiO}_2$ ; als Dielektrikum (4)  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  oder Polyimid und als hochpermeables Material (5) beispielsweise Co, Ni oder Fe in Betracht. Als Isolatorschicht (4) eignen sich selbstverständlich auch auflaminierte Folien, Epoxidharze oder Oxide des magnetostriktiven Materials.

Zur Herstellung der magnetostriktiven Dünnschichten, der elektrischen Leiter und der der Erhöhung der magnetischen Induktion dienenden hochpermeablen ferromagnetischen Schichten eignen sich physikalische oder chemische Abscheidungsprozesse. Zu nennen sind hier beispielsweise das Sputtern, das Aufdampfen, CVD-Verfahren oder die galvanische Schichtabscheidung. Aufgrund der vergleichsweise großen elektrischen und thermischen Leitfähigkeit der meisten magnetostriktiven Materialien kommt insbesondere das verfahrenstechnisch einfache und bezüglich der Abscheiderate effiziente DC-Magnetronsputtern mit einem Legierungs- oder Mosaiktarget in einer reinen Argonatmosphäre zur Anwendung. Die magnetostriktive Dünnschicht kann auch durch das sogenannte Co-Sputtern von mehreren Targets hergestellt werden, wobei der Argon-Sputtergaspartialdruck im Bereich von 0,01 Pa bis etwa 100 Pa, die Target-Sputterflächenleistungsdichte im Bereich von 0,1 bis 100  $\text{W}/\text{cm}^2$  liegen sollte. Die Strukturierung der Dünnschichten erfolgt mittels Lift-off-Technik oder durch Naß- bzw. Trockenätzverfahren.

#### 4.3 Anwendungen magnetostriktiver Dünnschichtaktoren

Das in Fig. 11 im Schnitt gezeigte, durch anisotropes Ätzen einer Si-Scheibe hergestellte Mikroventil besteht im wesentlichen aus einer biegsamen  $\text{SiO}_2$ -Zunge 19, einem auf der Zunge angeordneten Dünnschichtaktor 20 gemäß Fig. 4, 6 oder 8 und einer im Substrat 21 vorhandenen Ventilöffnung 22. Durch Bestromen des Aktors 20 kann man die Zunge 19 gesteuert soweit nach unten auslenken, bis diese die Ventilöffnung 22 verschließt. Um das Ventil zu öffnen, wird der Stromfluß unterbrochen und damit das die Magnetostriktion hervorruhende Magnetfeld innerhalb einer von der Eigeninduktivität des Aktors 20 abhängigen Zeit abgebaut. Mit dem Verschwinden der Magnetostriktion nimmt der Aktor 20 wieder seine ursprüngliche Gestalt an und die Zunge 19 hebt von der Ventilöffnung 22 ab.

Die  $\text{SiO}_2$ -Zunge 23 des in Fig. 12 dargestellten Biegeelements trägt sowohl einen magnetostriktiven Dünnschichtaktor 24 gemäß Fig. 4, 6 oder 8 als auch einen mit 25 bezeichneten Reflektor. Mit Hilfe des Aktors 24 kann die Zunge 23 nach unten gebogen und damit die Winkelstellung des Reflektors 25 bezüglich einer nicht gezeigten Lichtquelle geändert werden. Ein Array solcher Biegeelemente ließe sich beispielsweise in optischen Kommunikationssystemen einsetzen, um Laserlichtimpulse gezielt in bestimmte, durch das jeweilige Ansteuersignal des Aktors 20 vorgegebene Richtungen abzulenken. Eine Verwendung als steuerbares Spiegelement für flache Bildschirme kommt ebenfalls in Betracht.

#### 4.4 Leiterelemente mit kreis- oder ringförmigen Querschnitt

Bisher wurde davon ausgegangen, daß die Leiterelemente 11 des Aktors in Form von gegebenenfalls mää-

derförmig strukturierten Dünnschichten vorliegen. Es ist selbstverständlich auch möglich, das Leiterelement 11 als Band, Draht oder Rohr auszubilden, wobei für die Abfolge und Anordnung der magnetostriktiven, der elektrisch gut leitenden und der ferromagnetischen Schichten wieder die in Abschnitt 4.2 unter a) bis f) genannten Regeln zur Anwendung kommen. Querschnitte durch entsprechend aufgebaute draht- und rohrförmige Leiterelemente sind in den Fig. 13 und 14 dargestellt. Aktoren gemäß Fig. 14 können insbesondere als druckerzeugende Elemente Verwendung finden. Befestigt man einen solchen Aktor beispielsweise auf einem flüssigkeitsgefüllten Rohr und steuert ihn impulsförmig an, so ändert sich der Rohrdurchmesser schlagartig. Als Folge davon entstehen in der Flüssigkeit zwei Druckwellen, die in entgegengesetzte Richtungen laufen.

#### 4.5 Kompakt aufgebaute Aktoren

Ausgehend von einem ein- oder beidseitig mit einem Isolator 26 versehenen magnetostriktiven Band 27 lassen sich durch einfaches Aufrollen oder Falten und nachfolgendem Verkleben ebenfalls sehr kompakte Aktoren herstellen (s. Fig. 15). Ein ringförmiger Aktor entsteht, wenn man das beschichtete Band auf einen zylindrischen Körper aufrollt. Die nach Art einer Spule aufgebauten Aktoren besitzen einen sehr hohen Wirkungsgrad, da sie besonders starke Magnetfelder erzeugen.

#### 4.6 Ausgestaltungen und Weiterbildungen magnetostriktiver Aktoren

Die Erfindung beschränkt sich selbstverständlich nicht auf die beschriebenen Ausführungsbeispiele. So kann die Aktorform den jeweiligen Gegebenheiten angepaßt und die Homogenität des Magnetfeldes und der magnetischen Induktion im magnetostriktiven Material durch die spezifische, im allgemeinen parallele Ausrichtung der elektrisch leitenden, der magnetostriktiven und der ferromagnetischen Schichten, durch Geometrie und Material (Permeabilität  $\mu$ ) der Schichten, durch geeignete Stromdichte und Stromdichteverteilungen in diesen Schichten (Querschnittsfläche, spezifischer elektrischer Widerstand) durch die Abfolge der Schichten sowie der Art der elektrischen Ansteuerung (gepulste Stromzuführung) optimiert werden. Weiterhin ist es möglich, magnetostriktive Leiterelemente kreis- oder spiralförmig auf einer Oberfläche, insbesondere auf einer Membran anzuordnen. Derartige Systeme kann man als Schallerzeuger, als Pumpe oder als Einrichtung zum Verschließen einer Ventilöffnung verwenden.

Mehrere, einzeln ansteuerbare und konzentrisch auf einer Oberfläche angeordnete magnetostriktive Leiterelemente können ein sogenanntes Phased-Array bilden, das Ultraschall in einer durch die Phasenlage der Ansteuersignale vorgegebenen Richtung abstrahlt. Derartige Systeme sind in der Medizintechnik (Nieren-/Blasensteinertrümmerung) und im Bereich der bildgebenden Ultraschalldiagnostik von großer Bedeutung.

#### 5. Literatur

- /1/ H. Janocha (Herausgeber); Aktoren: Grundlagen und Anwendungen; Springer Verlag 1992; Seiten 278 bis 293
- /2/ DE 42 20 226 A1
- /3/ US 4 032 929
- /4/ US 4 757 219

#### Patentansprüche

1. Aktor mit einem elektrische Anschlüsse und mindestens ein Leiterelement (11) aufweisenden elektromechanischen Wandler, wobei
  - a) das Leiterelement (11) aus einem magnetostriktiven Material (1) besteht oder
  - b) das Leiterelement (11) geschichtet aufgebaut ist und mindestens eine erste Schicht (1) aus einem magnetostriktiven Material besteht.
2. Aktor nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß mehrere Leiterelemente (11) parallel zueinander angeordnet und in Reihe geschaltet sind.
3. Aktor nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß jeweils eine aus einem elektrisch leitenden, nicht magnetostriktiven Material (2) bestehendes Element (18) benachbarte Leiterelemente (11) miteinander verbindet.
4. Aktor nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß der Wandler in Form eines Mäanders ausgebildet und auf einem elektrisch nichtleitenden Körper (3, 13) angeordnet ist.
5. Aktor nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß der elektromechanische Wandler und ein stromführendes Element (2) derart auf einem elektrisch nichtleitenden Körper (3, 13) angeordnet sind, daß ein vom stromführenden Element (2) erzeugtes Magnetfeld das magnetostriktive Material (1) durchsetzt.
6. Aktor nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß mindestens eine zweite Schicht des Leiterelements (11) aus einem elektrisch leitenden Material (2) und/oder mindestens eine dritte Schicht aus einem hochpermeablen Material (5) besteht.
7. Aktor nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, daß die einzelnen Schichten durch Dielektrika (4) voneinander getrennt sind.
8. Aktor nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, daß das Leiterelement (11) eine durch magnetostriktives Material (1) — hochpermeables Material (5) — Dielektrikum (4) — elektrisch leitendes Material (2) gegebene erste Schichtenfolge oder eine durch Permutation der ersten Schichtenfolge entste-

hende zweite Schichtenfolge aufweist.

9. Aktor nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß sich die Abfolge der Schichten mehrfach wiederholt.

10. Aktor nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, daß die magnetostriktive erste Schicht (1), die hochpermeable dritte Schicht (5) oder eine dielektrische vierte Schicht (4) die elektrisch leitende zweite Schicht (2) vollständig umhüllt.

11. Aktor nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, daß das Leiterelement (11) einen quadratischen, rechteck-, kreis- oder ringförmigen Querschnitt besitzt.

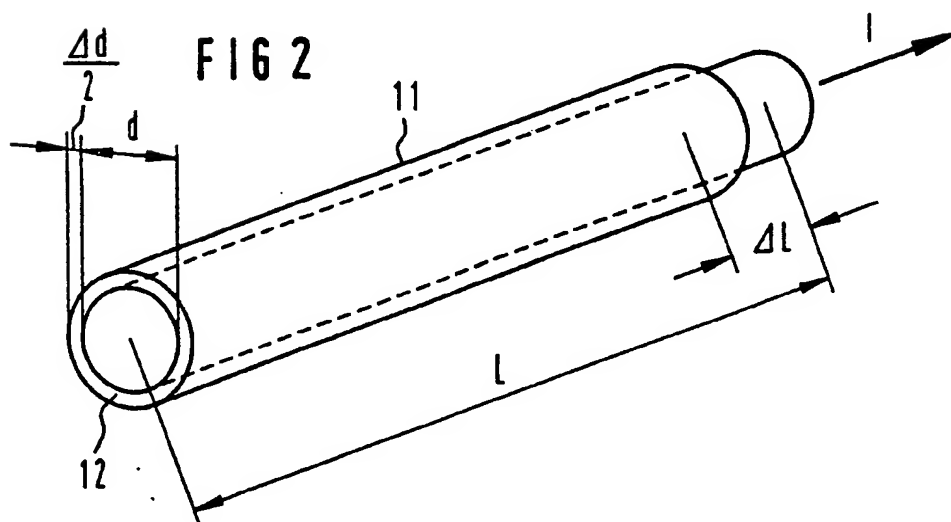
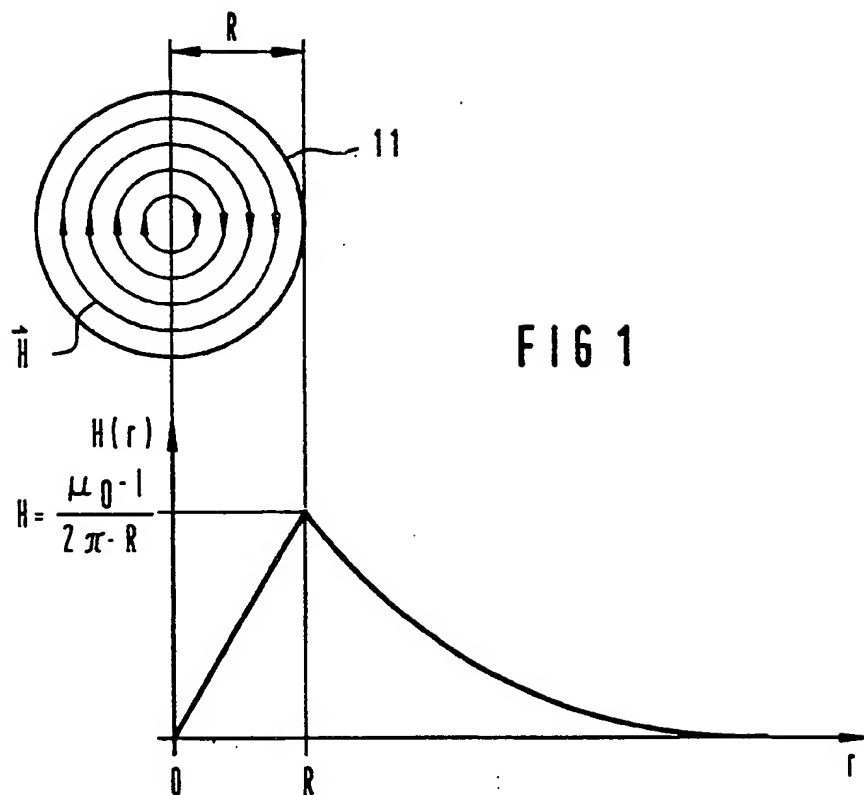
12. Aktor nach einem der Ansprüche 1 bis 10, dadurch gekennzeichnet, daß das Leiterelement als Draht, Band, rohrförmiger Körper oder Hohlkörper ausgeführt ist.

13. Aktor nach einem der Ansprüche 1 bis 11, dadurch gekennzeichnet, daß das Leiterelement (27) auf einem flexiblen Isolator (26) angeordnet und zu einem zylinderförmigen Körper, einen Hohlzylinder oder einem kompakten Körper gefaltet ist.

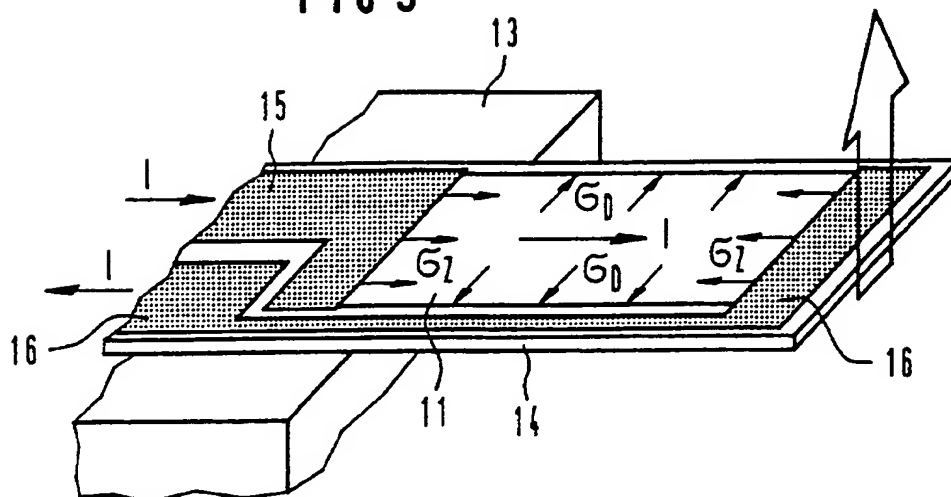
Hierzu 10 Seite(n) Zeichnungen

- Leerseite -

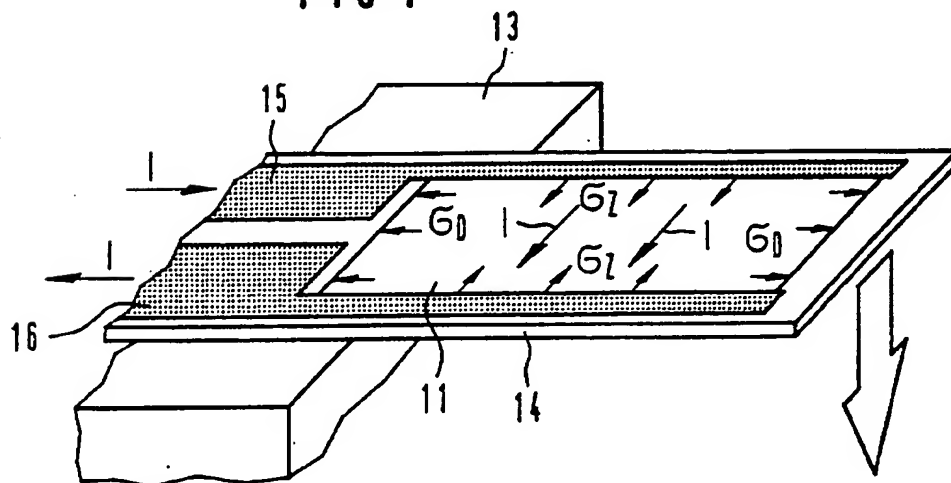


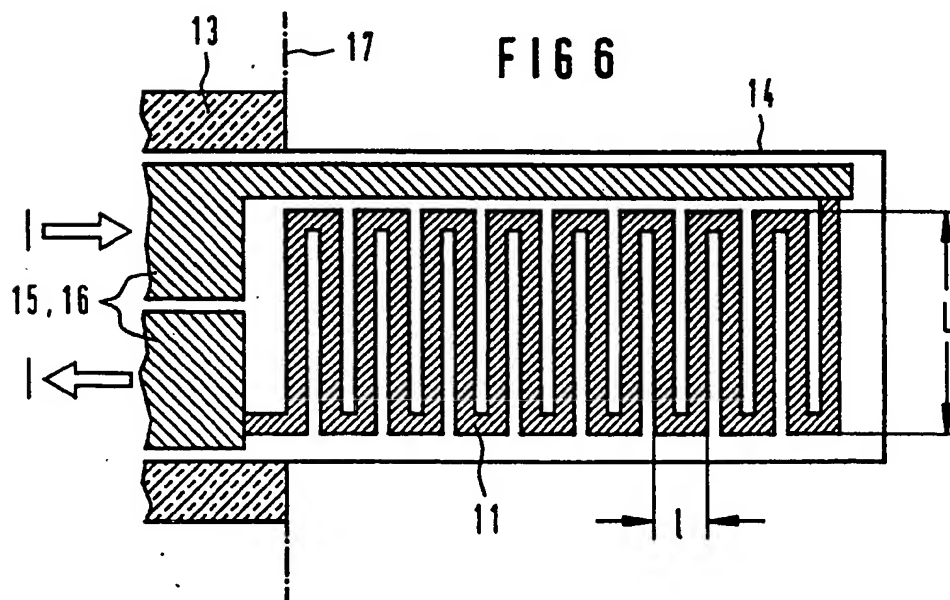
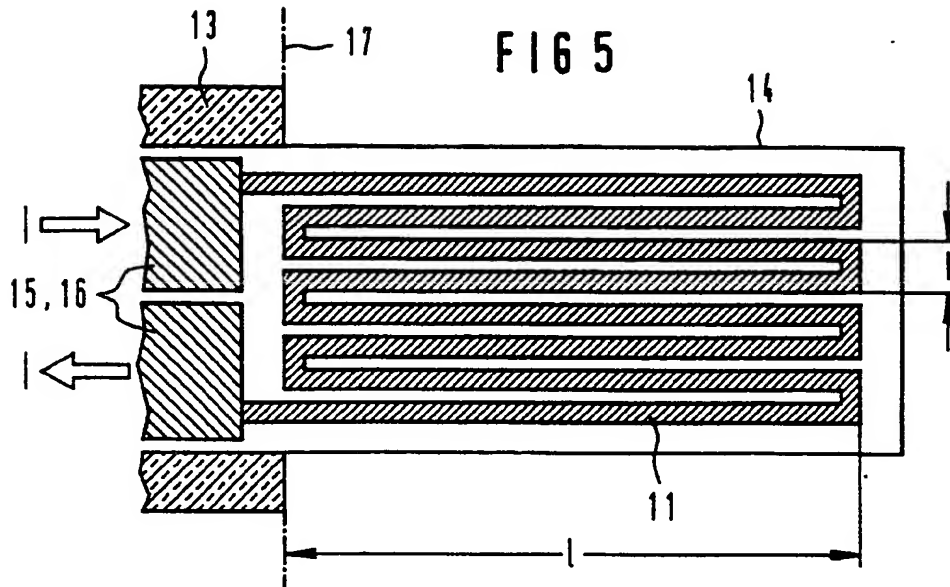


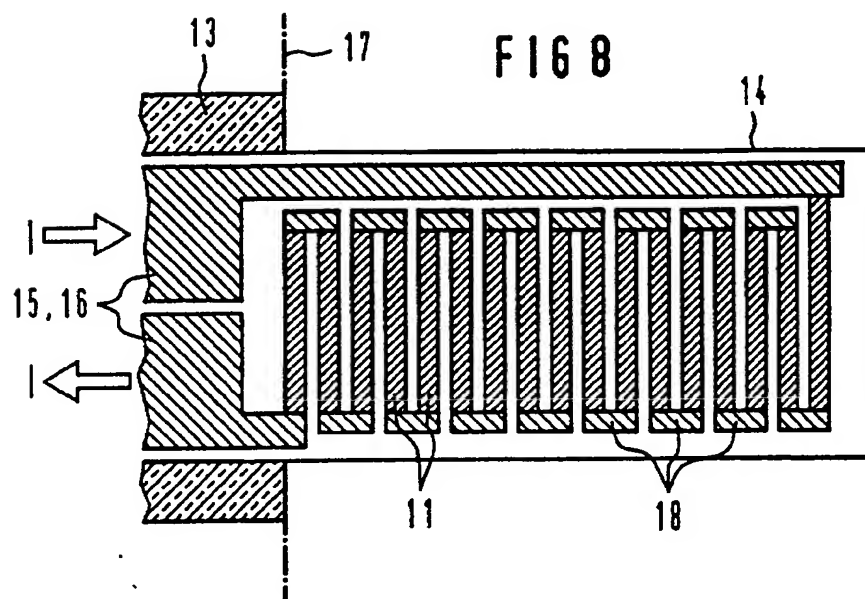
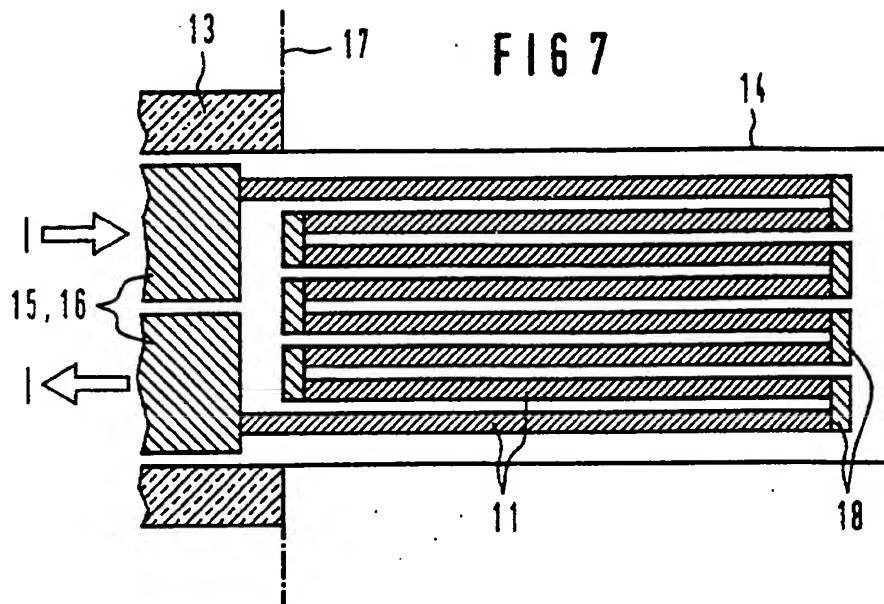
F16 3



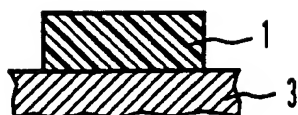
F16 4



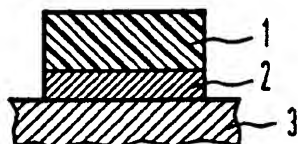




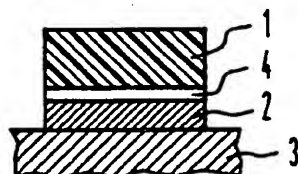
F16 9a



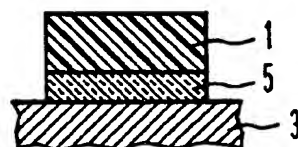
F16 9b



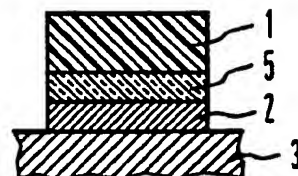
F16 9c



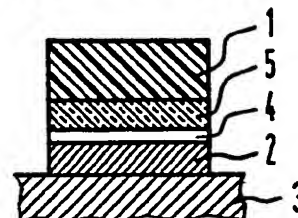
F16 9d



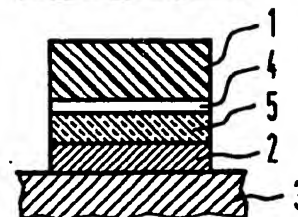
F16 9e



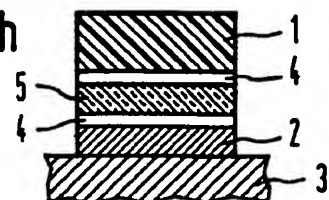
F16 9f



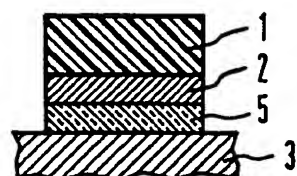
F16 9g



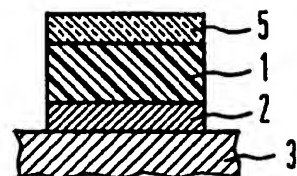
F16 9h



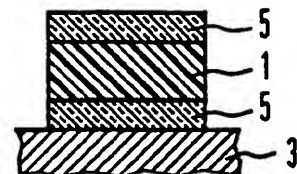
F16 9i



F16 9j



F16 9k



F16 9l

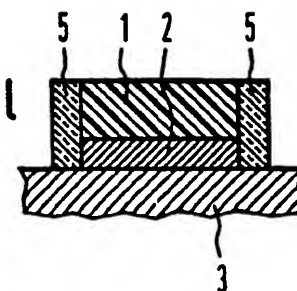


FIG 10a

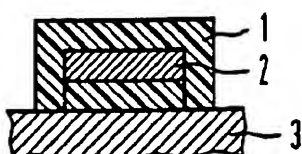


FIG 10e

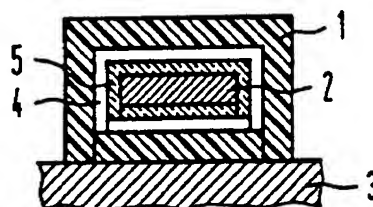


FIG 10b

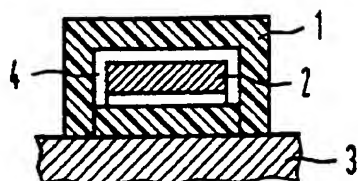


FIG 10f

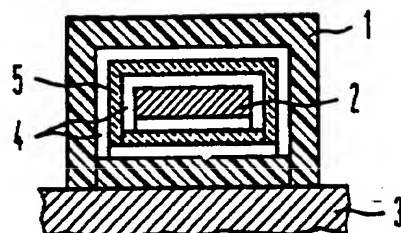


FIG 10c

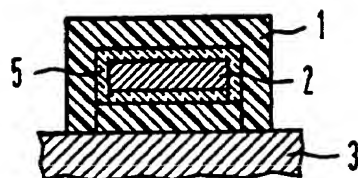


FIG 10g

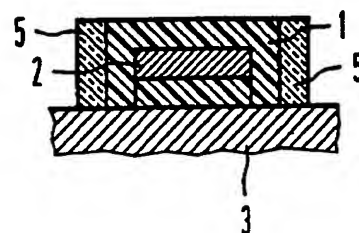


FIG 10d

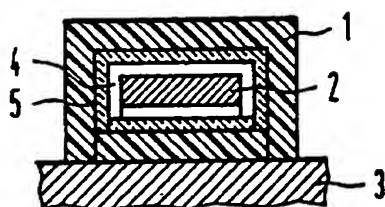


FIG 11

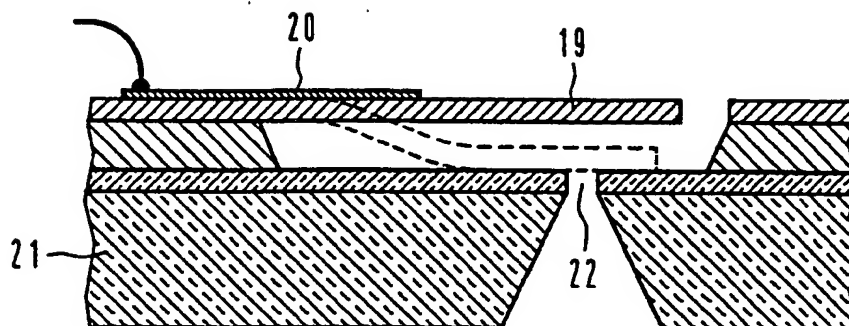


FIG 12

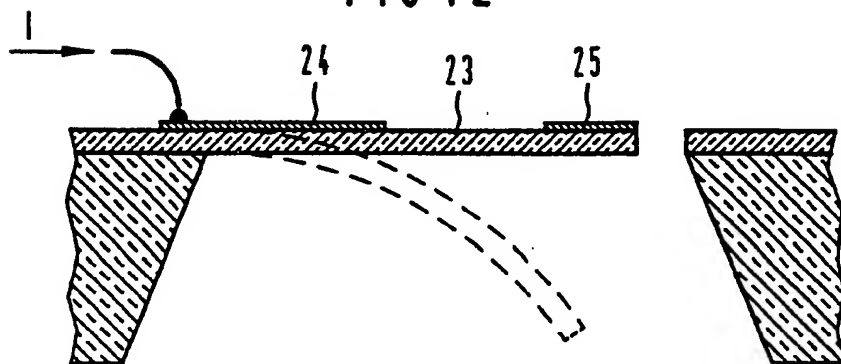


FIG 13a

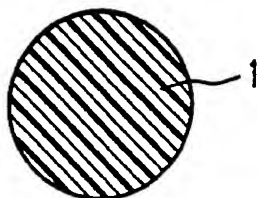


FIG 13b

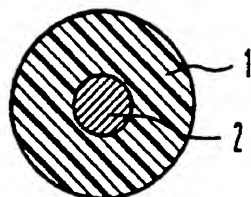


FIG 13c

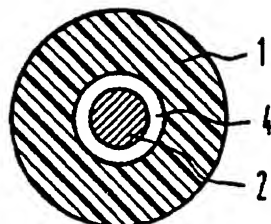


FIG 13d

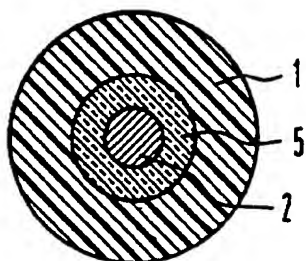


FIG 13e

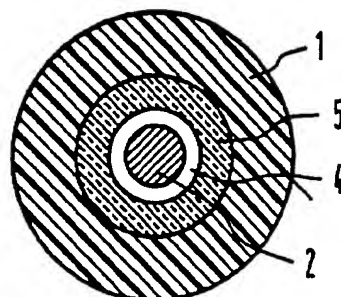


FIG 13f

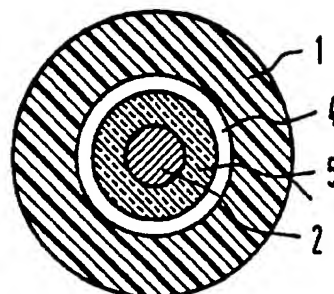


FIG 13g

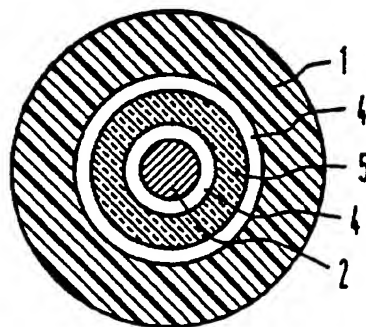




FIG 14a

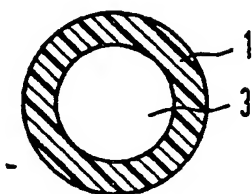


FIG 14b

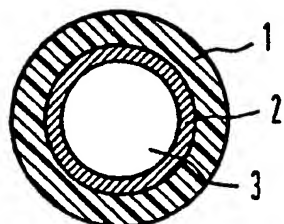


FIG 14c

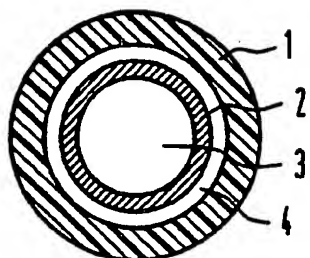


FIG 14d

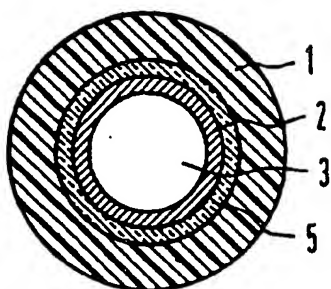


FIG 14e

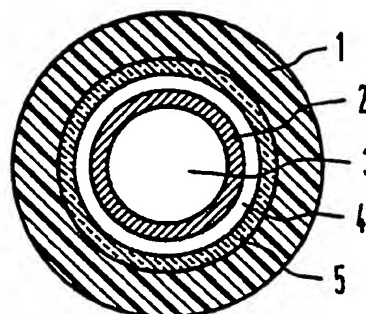


FIG 14f

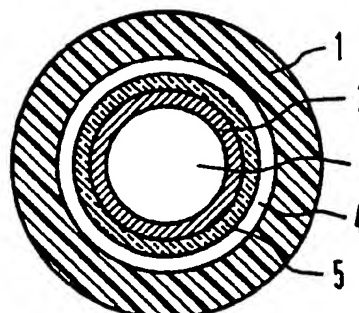


FIG 14g

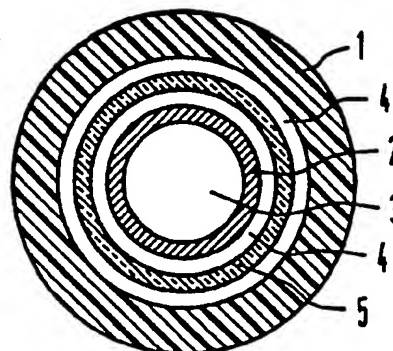


FIG 15a

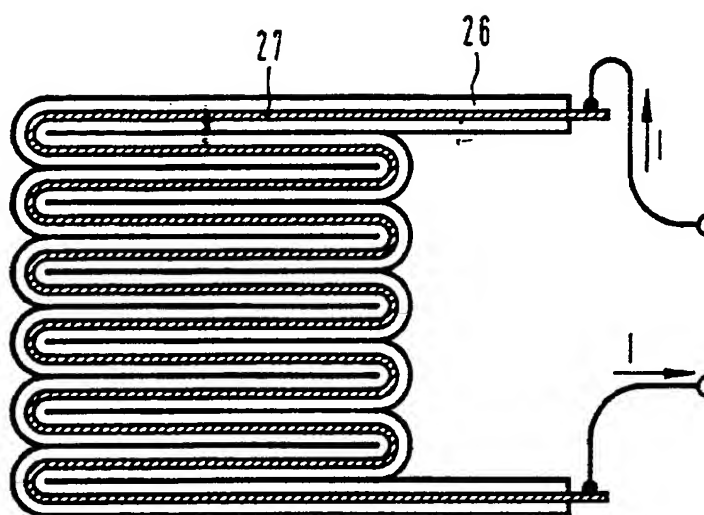
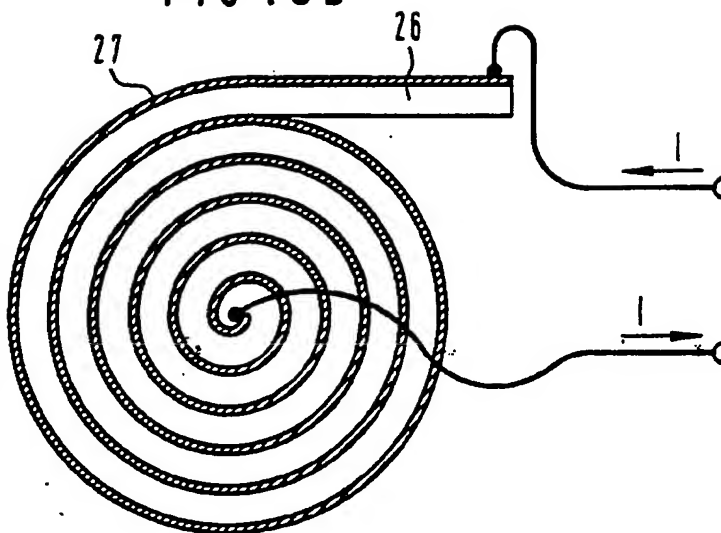


FIG 15b



# Magnetostrictive thin film actuator as drive for miniaturised valve, bending element, or pump

**Patent number:** DE19510250  
**Publication date:** 1996-05-02  
**Inventor:** KAPPEL ANDREAS DIPL PHYS [DE]; MOCK RANDOLF DR [DE]; MEIXNER HANS PROF DR [DE]  
**Applicant:** SIEMENS AG [DE]  
**Classification:**  
- **international:** H01L41/083; H01L41/12; H04R15/00; H01L41/16; A61B17/225; F04B43/04  
- **europaean:** F04B53/10F4B; H01L41/12; H04R15/00  
**Application number:** DE19951010250 19950321  
**Priority number(s):** DE19951010250 19950321

## Abstract of DE19510250

The actuator has a drive element which uses Terfenol (RTM) TbxDY1-xFe2 material. The serpentine conductor on a substrate (3) of the actuator is coated (1) such as with Terfenol (RTM) in a layer of only a few micrometres thick. The coating, with electrical connections, acts as a coil, for a magnetic field to be produced externally at a closely adjacent conductive layer (2), and an inner magnetic field through the magnetostrictive material (1) for actuation uses.

FIG 10a



FIG 10e



FIG 10b



FIG 10f

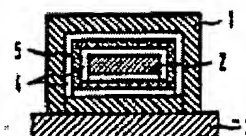


FIG 10c

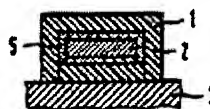


FIG 10g

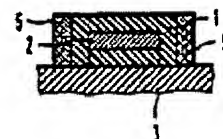
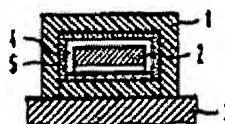


FIG 10d



Data supplied from the esp@cenet database - Worldwide

BEST AVAILABLE COPY